

Make:

Kapazitätsmessgerät für Powerbanks und Akkuzellen

29.04.2020 11:10 Uhr Clemens Verstappen



**Wie viel Energie kann ich meiner Lithium-Ionen-Akkuzelle oder meiner Powerbank tatsächlich entnehmen?
Unser Kapazitätsmessgerät bringt Klarheit.**

Mit dieser Schaltung lässt sich die Kapazität und die gespeicherte Energie einer USB-Powerbank oder eines einzelnen Lithium-Ionen- oder NiMH-Zelle-Akkumulators messen. Den Entladestrom und die Entladeschlussspannung kann man vor dem Entladen im Menü per Tastendruck einstellen. Auf dem LC-Display wird während des Entladevorgangs die Spannung, der Entladestrom sowie die bereits genommene Kapazität und Energie angezeigt. Wird die Entladeschlussspannung unterschritten, schaltet der Laststrom ab und der Entladezyklus ist beendet.

Die Kapazität einer Powerbank bezieht sich üblicherweise auf die Gesamtkapazität der in ihr verbauten Lithium-Ionen-Zellen. Ein Aufwärtswandler erzeugt die 5V und hält sie stabil, bis die Zellen erschöpft sind. Die Angabe der entnehmbaren Energie ist hier von größerer Bedeutung, denn sie beinhaltet die Verluste durch den Schaltwandler.

Der aufgedruckte Energieinhalt in Wh ist allerdings oft nur das Produkt aus Zellenkapazität und nominaler Akkuspannung; der Wert beinhaltet dann keine Wandlerverluste. Mit der Angabe der Kapazität in Ah sind Powerbanks besser untereinander vergleichbar; man findet sie vereinzelt auf Akkupacks von Laptops oder auf den Zellen selber.

KURZINFO

- Messung der Kapazität und der gespeicherten Energie mittels Stromsenke
- Geeignet für Powerbanks, Lithium-Ionen und NiMH-Zellen
- Aufbau und Löten der Schaltung auf einer Platine

Material

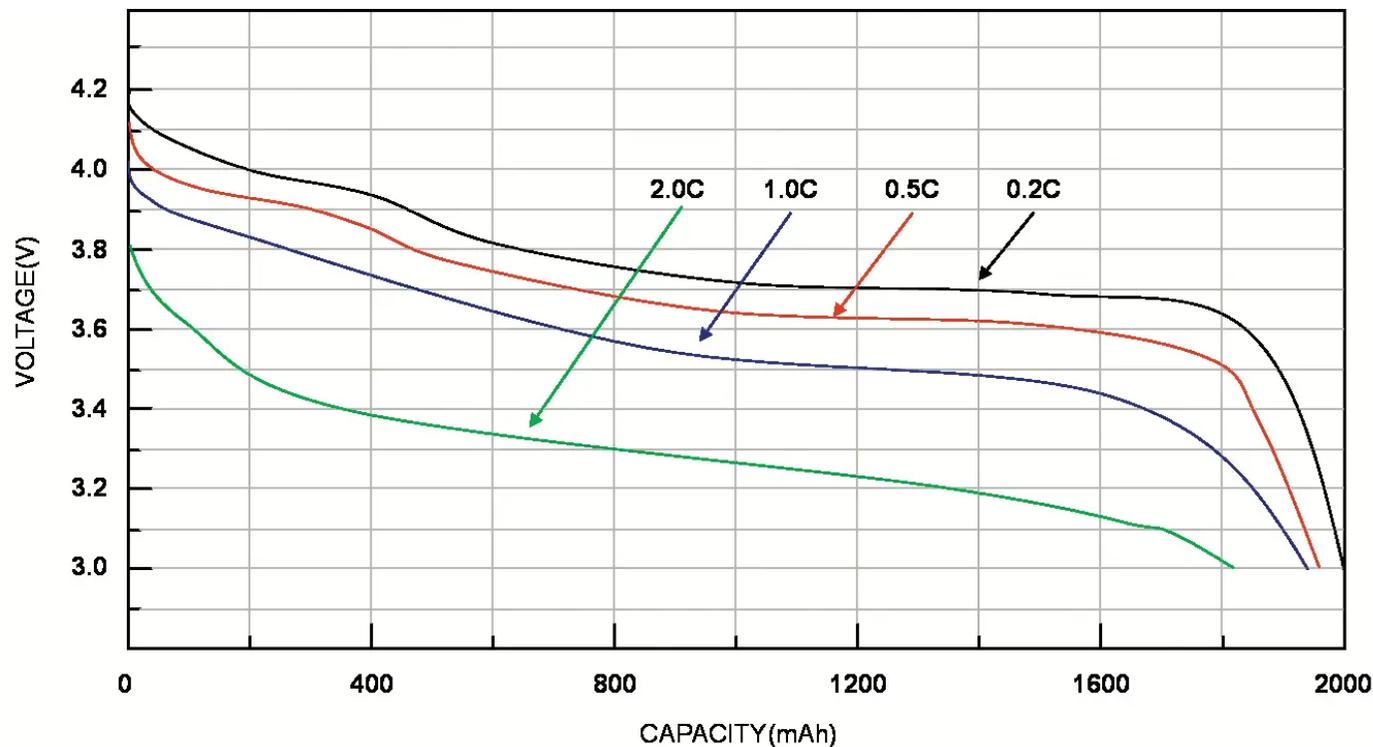
- Platine Kapazitätsmessgerät, Bauteile laut **Stückliste [1]**

Checkliste

- Zeitaufwand: ein Tag

- Kosten: 35 Euro
- Programmieren: Kenntnisse in C++ und Arduino-IDE
- Löten: Aufbau und Verlöten auf doppelseitiger oder Lochrasterplatine
- Elektronik: Kenntnisse in Analog- und Digitaltechnik

Doch erst einmal zurück zur Kapazität von Lithium-Ionen-Zellen: diese wird in mAh angegeben. Für eine Zelle im üblichen Format 18650 sind derzeit Werte von 3000 bis 3500mAh Stand der Technik. Lade- und Entladeströme werden gerne mit dem Faktor "C" auf die nominale Kapazität bezogen. Beispiel: Ein Akku mit 3Ah und einem maximalen Ladestrom von 0,5C darf mit 1,5A geladen werden.



Beispiel der Entladekurve einer Lithium-Ionen-Zelle für verschiedene Entladeströme

Die Entladekurve oben zeigt den Spannungsverlauf über die entnommene Kapazität an. 100% entsprechen in unserem Beispiel der nominalen Kapazität von 3000mAh. Oben in der Abbildung findet sich hier das "C" wieder. Dieser Wert wird als Parameter in Form von unterschiedlichen Farben im Diagramm dargestellt. Der obere Graf in schwarz entspricht einer Entladung mit 0,2C, dies entspricht einem Strom von 0,6A. Zwei wesentliche Faktoren lassen sich unmittelbar entnehmen: Zum einen kann die maximale Kapazität bei einer Entladung mit 2C nicht entnommen werden, zum anderen ist die Spannung deutlich geringer und somit auch die zu entnehmende Energie.

POWERBANK-INNENLEBEN ▲



Die kleine Platine in jeder Powerbank erfüllt mehrere Funktionen. Sie enthält einen Aufwärtswandler, der die Gleichspannung des Akkus auf eine konstante Gleichspannung von 5V anhebt, einen Überlastschutz, der abschaltet, wenn der Ausgangsstrom von 0,5A überschritten wird, einen Tiefentladeschutz und eine Ladeelektronik. Nachteil der Schaltungen sind die Wandlungsverluste beim Wandeln auf 5V beziehungsweise beim Laden der Zelle.

Zuweilen sorgt eine Abschaltung der 5V-Ausgangsspannung für Verwirrung, wenn ein zu geringer Laststrom fließt. Dies ist besonders ärgerlich, wenn man plant, einen kleinen Verbraucher (Mikrocontrollerschaltung) längerfristig aus einer USB-Powerbank zu versorgen. Diese schaltet jedoch nach kurzer Zeit ab: die abgebildete bei Unterschreitung eines Stromes von 10mA nach ca. 30 Sekunden. Ein weiterer Nachteil ist der Ruhestrom, den diese Schaltung entnimmt (hier etwa 100µA). Um eine Tiefentladung und somit eine Beschädigung der Zelle zu vermeiden, sind Powerbanks regelmäßig wieder aufzuladen.

Möchte man die Kapazität einer Zelle messen und mit einem **Datenblatt [2]** vergleichen, ist eine Entladung mit einem konstanten Strom notwendig. Diagramme wie die abgebildete Entladekurve sind unter diesen

Bedingungen entstanden. Der Entladestrom sollte zwischen 0,1C und 0,2C gewählt werden, um möglichst viel Energie entnehmen zu können. Um dies schaltungstechnisch zu realisieren, scheidet eine Entladung über einen Widerstand aus; bei diesem würde sich der Entladestrom mit abnehmender Spannung ebenfalls verringern. Stattdessen bietet sich hierfür eine Stromsenke an; dazu später mehr.

Kapazität und Energie

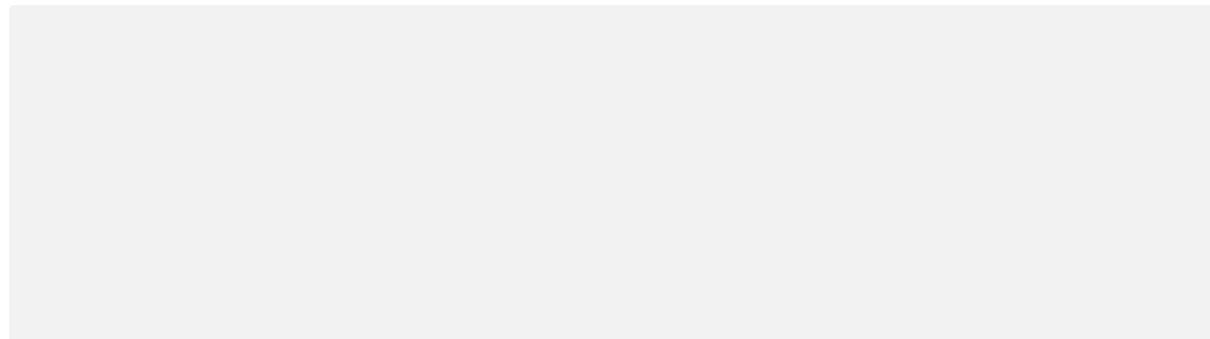
Für die Messung der Kapazität einer Akku- Zelle muss man den Stromfluss und die Dauer kennen und über die Zeit miteinander multiplizieren (d. h. integrieren). Ist der Strom konstant, reicht es, die Entladezeit zu bestimmen. Die Kapazität errechnet sich wie folgt:

$$\text{Kapazität (Ah)} = \text{Entladestrom (A)} \times \text{Entladedauer (h)}$$

Für die Berechnung der Energie ist zusätzlich die Zellspannung erforderlich, mit der die bereits ermittelte Kapazität multipliziert wird:

$$\text{Energie (Wh)} = \text{Zellenspannung (V)} \times \text{Entladestrom (A)} \times \text{Zeit (h)}$$

Die Zellenspannung ist nun leider nicht konstant über den Entladeprozess, sodass in kleinen Zeitintervallen die Spannung mit dem Strom multipliziert und aufsummiert werden muss.



[3]

Schaltungsbeschreibung

Bevor der Entladeprozess gestartet wird, teilt man dem Controller den Entladestrom und die dem Datenblatt der Zelle zu entnehmende Entladeschlussspannung mit. Nach dem Start der Entladung misst er sekundlich die Zellspannung und den aktuell fließenden Strom. Die bereits entnommene Kapazität und Energie werden berechnet auf dem Display angezeigt, bis die Entladeschlussspannung unterschritten wird und der Entladeprozess stoppt. Hierbei ist es unerheblich, ob eine Powerbank oder eine Lithium-Ionen-Zelle angeschlossen ist. Die Powerbank schaltet ohnehin selbstständig ab, wenn ihre Zellen erschöpft sind.

AKKU VS. KONDENSATOR

Bei Akkus oder Kondensatoren entspricht die Kapazität einer elektrischen Ladung: $1\text{As} = 1\text{Coulomb} = 6,24 \times 10^{18} e$, wobei e der kleinsten Elementarladung entspricht (Ladung eines einzelnen Elektrons). Hat man einen Akku eine Sekunde lang mit einem Ampere geladen, so ist eine Ladung von $6,24 \times 10^{18}$ Elektronen transportiert worden. Bei Akkus und Batterien wird diese Ladung, oder auch Kapazität, in mAh ($\text{As} \times 3600$) oder bei größeren Blöcken in Ah angegeben.

Die elektrische Kapazität C eines Kondensators wird in der Einheit Farad (F) angegeben. Im Unterschied zur Batterie wird dies durch die Einheiten As/V ausgedrückt: $1\text{F} = 1 (\text{As})/\text{V}$.

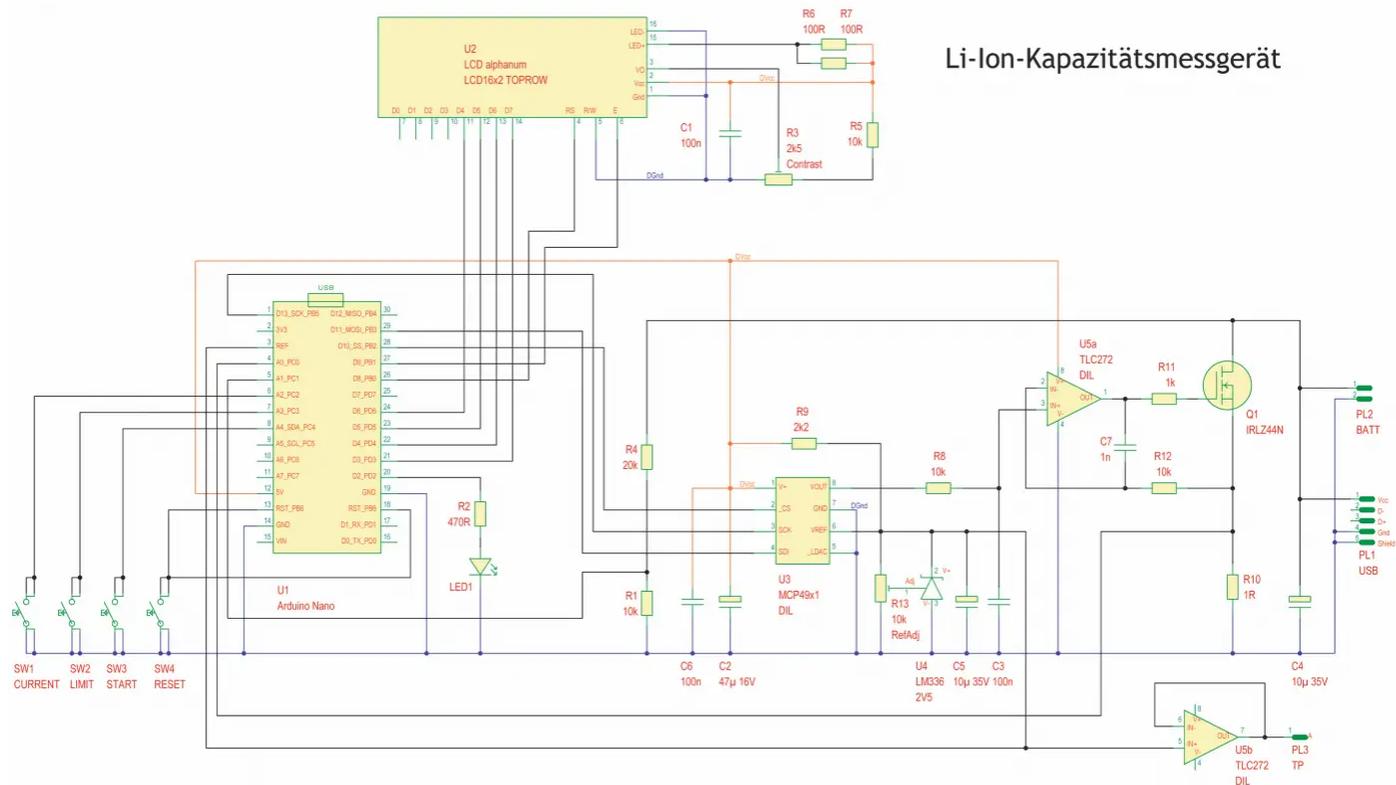
Der Arduino Nano steuert den Entladeprozess, er misst laufend die Spannung und den Entladestrom des Akkus. Über die Eingänge A1 und A0 erfolgt die Analog-Digitalumsetzung im ATmega328-Mikrocontroller. Die Eingänge A2, A3 und A4 sind mit den Tastern S1, S2 und S3 verbunden. Mit S1 und S2 werden der Entladestrom und die Entladeschlussspannung eingestellt. S3 startet den Entladezyklus. Sechs weitere Ports steuern das zweizeilige LC-Display. LED1 blinkt, solange der Entladezyklus aktiv ist. U4 erzeugt eine stabile Referenzspannung von 2,5V, die wird für den Analog-Digitalumsetzer des Arduino und den Digital-Analogumsetzer U3 verwendet (der Arduino hat keinen internen Digital-Analog-Wandler). Der MCP4911 steuert mit einer Auflösung von 10 Bit den Entladestrom der Stromsenke, angeschlossen ist er über die SPI-Leitungen.

Unsere elektronische Last ist eine Stromsenke, quasi ein Verbraucher mit einstellbarem, aber konstantem Laststrom. Der variable Teil des Lastwiderstands ist hier ein MOSFET, dieser wird von einem Operationsverstärker (OP, hier U5a) so weit aufgesteuert, dass genau der voreingestellte Laststrom fließt. Es handelt sich also um einen Regelkreis, der Einflüsse von außen, wie zum Beispiel die Änderung der Akkuspannung, ausgleicht; die Regelung hält den Strom im gesamten Entladezyklus konstant.

Am nichtinvertierenden Eingang des OPs (+) wird die Steuerspannung (Soll-Größe) vom Digital-Analogumsetzer angelegt, auf die geregelt werden soll. Am invertierenden Eingang (-) liegt die Spannung an, die dem tatsächlich fließenden Laststrom entspricht (Ist-Größe). Der OP vergleicht diese beiden Spannungen und erzeugt am Ausgang eine Regelspannung, die über das Gate des MOSFET Q1 den Laststrom regelt. Widerstand R10 dient vorrangig zum Messen des Laststromes, wandelt aber auch einen Teil der Verlustleistung in Wärme um. Der fließende Strom berechnet sich zu

$$I (\text{Laststrom}) = U (\text{Steuerspannung}) / R10$$

Der IRLZ44 ist ein sogenannter Logic-Level-MOSFET, der eine vergleichsweise geringe Spannung am Gate benötigt, um einen hohen Drainstrom fließen zu lassen. Dies ist für diese Schaltung besonders wichtig, da die Spannungsversorgung des OPs (und damit seine maximale Ausgangsspannung) nur 5V beträgt und der Spannungsabfall über R10 der Gate-Source-Spannung noch entgegenwirkt. Wir haben das Einschaltverhalten mit verschiedenen Entladeströmen getestet, eine Schwingneigung konnten wir nicht feststellen. Kleiner Exkurs: In der Regelungstechnik tritt eine Schwingneigung immer dann auf, wenn das Stellglied (hier die Ausgangsstufe Q1) langsamer arbeitet als der Regelmechanismus (hier der OP U5a).



Schaltplan mit Arduino Nano, LC-Display und Stromsenke. Mit R3 stellt man den Display-Kontrast ein, mit R13 die Referenzspannung (exakt 2,5V an TP).

Verlustleistung

Die dem Akku entnommene Energie wird im Widerstand R1 und im MOSFET in Wärme umgesetzt, Q1 benötigt deshalb einen Kühlkörper. Wird eine Powerbank mit 2A entladen, entsteht eine Verlustleistung von $5V \times 2A = 10W$. Hiervon entfallen 4W auf R10 und 6W auf den MOSFET. R10 ist für 5 Watt ausgelegt und somit knapp an der Belastungsgrenze. R10 fungiert ferner als Sicherung in dem Fall, falls der MOSFET wegen Überhitzung einen Drain-Source-Kurzschluss erzeugt. Er dient dann als Strombegrenzung und wird durch Überlast hochohmig.

Aufbau

Für einen unkomplizierten Aufbau haben wir eine Platine entworfen, das Layout finden Sie ebenso wie die Firmware **bei uns auf GitHub [4]**. Eine fertige Leerplatine werden Sie auch in unserem Shop erhalten. Beginnen

Sie wie üblich mit den niedrigen Bauteilen (Widerstände, IC-Fassungen). Der Arduino und das LC-Display können sowohl mit Steckfassungen versehen als auch direkt eingelötet werden – Letzteres empfehlen wir nur bei genügend Vertrauen in die eigenen Lötkünste.

Sketch

Über die Arduino-IDE lädt man die Firmware auf den Arduino Nano. Der Sketch ist bei Github herunterzuladen. Vor dem Kompilieren sind zwei Bibliotheken zu installieren: LiquidCrystal lässt sich über den Bibliotheksverwalter installieren. Es handelt sich um die Arduino/Adafruit-Version 1.0.7. Die Bibliothek DAC_MCP49xx ist bei Github verfügbar. Wir haben sie als ZIP-Datei heruntergeladen und anschließend über die Funktion /Sketch/Bibliothek einbinden/ZIP Bibliotheken hinzufügen installiert. Nun kann der Sketch kompiliert und auf den Arduino hochgeladen werden.

`Setup()` initialisiert zuerst den Digital-Analog-Wandler und das LC-Display, danach konfiguriert es die Pins für die Taster als Eingänge und aktiviert die zuständigen Pull-up-Widerstände im Controller. Mit dem Kommando `analogReference(EXTERNAL)` wird dem Controller die externe Referenz (hier die 2,5V von U4) für den Analog-Digital-Wandler zugewiesen. Es schließt sich die Initialisierung der seriellen Schnittstelle an.

Die Hauptschleife `loop()` wird mit Hilfe des Interrupt-gesteuerten Zählers `millis()` in festen Abständen von 150ms für die Tastenabfrage durchlaufen; nach dem Betätigen von START ändert sich der Zyklus auf 1000ms. Die Messwerte werden nun jede Sekunde neu berechnet, angezeigt und über die serielle Schnittstelle ausgegeben. Mit einem Terminalprogramm lassen sich diese Daten aufzeichnen und gegebenenfalls weiterverarbeiten. Die weiteren Funktionen kann man den Kommentaren im Sketch entnehmen.

Nach Anlegen der Versorgungsspannung startet der Controller; auf dem LC-Display erscheint in der ersten Zeile "Strom Spannung" und in der Zeile darunter die angewählten Werte, die man mit den Tastern ändern kann. Hierbei sind nur die im Sketch vordefinierten Werte möglich, die man gegebenenfalls anpassen kann. Die Entladung beginnt mit dem Tastendruck START, ein Abbruch ist über die RESET-Taste möglich.

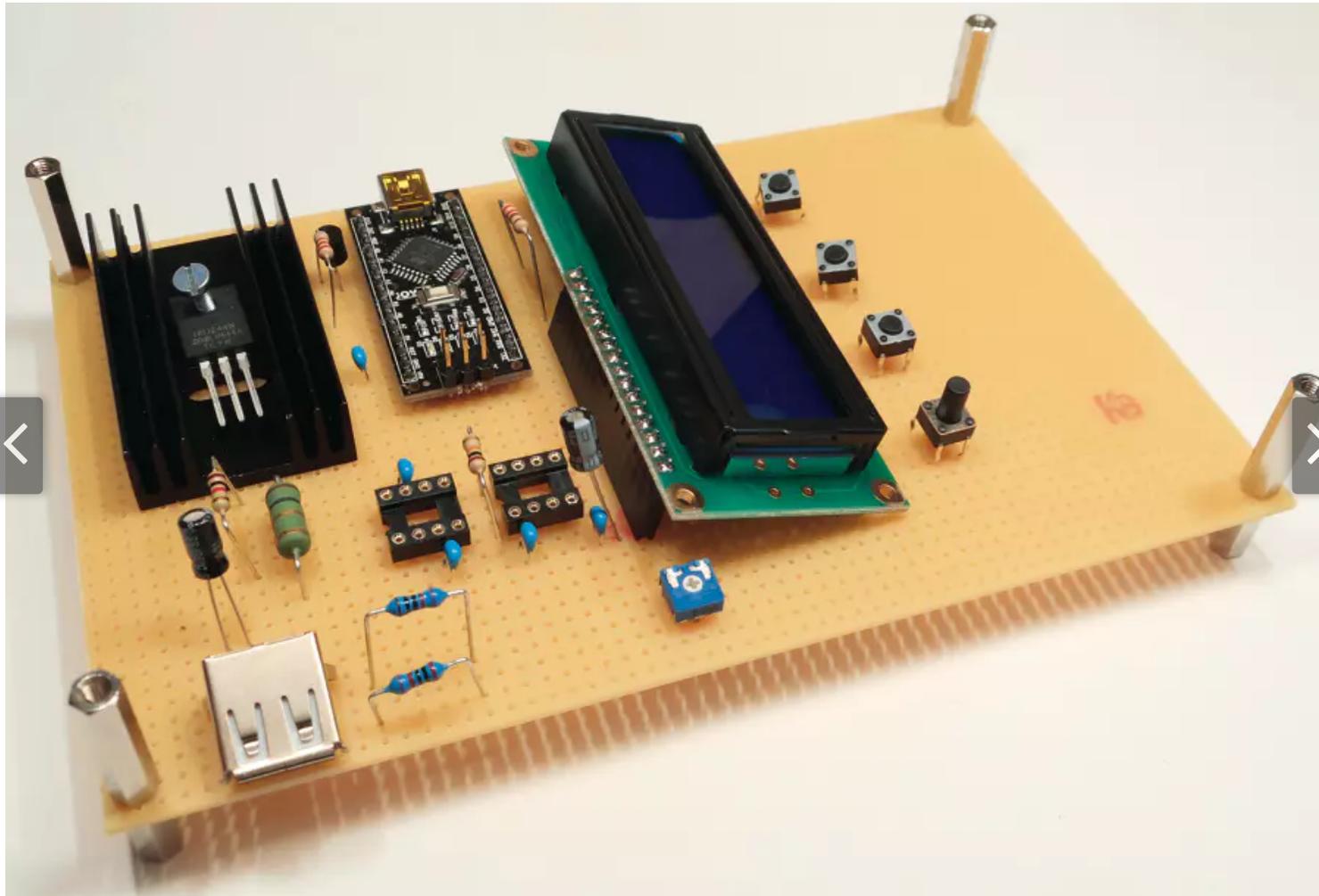
Messungen

Die Kapazität lässt sich recht genau bestimmen, da nur der Entladestrom und die Zeit eingehen; Letztere ist quatzgenau. Die Messung des Stroms ist jedoch fehlerbehaftet, allein durch die Toleranz des Shunts R10. Durch die Temperaturabhängigkeit ist auch hier noch einmal mit einem Fehler von ca. 1,5% zu addieren. Fehler durch die Analog-Digitalumsetzung und Rundungsfehler der Firmware seien hier vernachlässigt.

Bilderstrecke

Kapazitätsmessgerät für Powerbanks und Akkuzellen

Bild 1 von 5



[6]

Die entnehmbare Kapazität eines Akkus ist sehr vom Entladestrom abhängig; bei einer Messung der Kapazität ist dieser mit anzugeben. Die Messung des Energieinhalts birgt einen weiteren Faktor in der Fehlerrechnung, dies ist jedoch vornehmlich bei der Vermessung von Powerbanks von Bedeutung. Unser Gerät misst nicht direkt am Akku (was genauer wäre), sondern die Spannung am Ende des Kabels. Zur Orientierung: Bei einem Entladestrom von 1A fallen schon ca. 400mV alleine über ein kurzes USB Kabel ab.

Vor der Messung ist die Zelle mit einem geeigneten Ladegerät aufzuladen. Lassen sich die genauen Daten der Zelle nicht ermitteln, kann man die Ladeschlussspannung mit 4,2V und die Entladeschlussspannung mit 3,0V annehmen. Diese Werte gelten nicht für LiFePo4-Zellen! Ein Entladestrom von 0,5A sollte für 18650-Zellen sinnvolle Messwerte liefern. Für das Entladen bietet sich eine Batteriehalterung des Typs 18650 an, die mit einem USB-A-Steckverbinder versehen ist.

Möchte man ausgediente Akkupacks einer weiteren Verwendung zuführen, kann man die einzelnen Zellen entnehmen, prüfen und anhand der gesammelten Daten zu einem neuen Satz zusammenstellen. Durch die häufigen Lade- und Entladezyklen haben die Zellen ihre anfängliche Kapazität zwar verloren, oftmals ist auch nur eine Zelle in einem Satz defekt. Per Definition hat eine Zelle ihr Lebensende erreicht, wenn sie nur noch 80% ihrer nominalen Kapazität hat.

Die Vermessung der abgebildeten Powerbank hat bei einem Entladestrom von 0,5A eine Energie von 5,7Wh ergeben. In der Powerbank ist eine Lithium-Ionen-Zelle der Größe 18650 verbaut. Eine separate Vermessung der Li-Ionen-Zelle ergab dagegen 6,6Wh. Die Verluste von 14 Prozent liegen im Wandler, Steckverbinder und im USB-Kabel begründet. Auf der Zelle hat der Hersteller die entnehmbare Energie von 7,4Wh aufgedruckt, diese wird sie neuwertig auch gehabt haben.

DEFINITION DER ABMESSUNGEN FÜR RUNDZELLEN ▲



Die Kodierung 18650 resultiert aus den Abmessungen der Zelle. Hierbei stehen die ersten beiden Ziffern für einen Durchmesser von 18mm, die folgenden 650 für eine Länge von 65mm. Hierbei sind die 650 durch 10 zu teilen. Bei einer herkömmlichen Lithium-**Knopfzelle [7]** CR2032 hat die Zelle einen Durchmesser von 20mm und eine Dicke von 3,2mm. Andere Zellen wie Mignon, Mikro und Mono lassen sich auch in dieses Schema eingruppiieren.

Gefahren

Über den separaten Batterieanschluss ließen sich natürlich auch Akkus mit höheren Spannungen als 5V anschließen. In Kombination mit großen Entladeströmen entstehen allerdings Verlustleistungen im Shunt und im FET, für die die Bauteile nicht ausgelegt sind. Bei höheren Spannungen als 5V wird der MOSFET überlastet und wird durchbrennen, zusammen mit dem dann überlasteten Shunt R10 besteht Brandgefahr.

Kleine Anmerkung dazu: Die im Datenblatt angegebene maximale Verlustleistung des MOSFET ist für die Schaltverluste im Impulsbetrieb berechnet; im linearen Betrieb (wie hier) liegt sie weit darunter. Nur einige wenige MOSFET-Typen sind für linearen Betrieb bis zur Verlustleistungsgrenze zugelassen; darunter finden sich aber keine Logic-Level-MOSFETs. (**cm [8]**)

URL dieses Artikels:

<https://www.heise.de/-4709559>

Links in diesem Artikel:

[1] <https://github.com/MakeMagazinDE/Kapazit-Messg#st%C3%BCckliste>

[2] <https://www.ineltro.ch/media/downloads/SAAItem/45/45958/36e3e7f3-2049-4adb-a2a7-79c654d92915.pdf>

[3] <https://www.heise.de/make/>

[4] <https://github.com/MakeMagazinDE/Kapazit-Messg>

[5] https://www.heise.de/bilderstrecke/bilderstrecke_4709587.html?back=4709559

[6] https://www.heise.de/bilderstrecke/bilderstrecke_4709587.html?back=4709559

[7] <https://de.wikipedia.org/wiki/Knopfzelle>

[8] <mailto:cm@ct.de>

Copyright © 2020 Heise Medien